

Conference Paper, Published Version

Espert, Manfred; Stelzer, Oliver; Schum, Stefan
Planung und Ausführung der Baugrube für die
Instandsetzung der Schleuse Bamberg

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102128>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Espert, Manfred; Stelzer, Oliver; Schum, Stefan (2010): Planung und Ausführung der Baugrube für die Instandsetzung der Schleuse Bamberg. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Tiefe Baugruben an Bundeswasserstraßen. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 91-103.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Planung und Ausführung der Baugrube für die Instandsetzung der Schleuse Bamberg

Dipl.-Ing. (FH) Manfred Expert, Wasser- und Schifffahrtsamt Nürnberg

Dipl.-Ing. Oliver Stelzer, Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, Abteilung Geotechnik

Dipl.-Ing. Stefan Schum, König und Heunisch Planungsgesellschaft mbH, Frankfurt a. M.

1 Einleitung

1.1 Schleuse Bamberg

Die Schleuse Bamberg befindet sich bei km 7,417 des Main-Donau-Kanals (MDK) und ist damit die nördlichste von insgesamt 16 Schleusenanlagen des MDK, der einzigen Binnenwasserstraßenverbindung zwischen den westlichen und südöstlichen Wasserstraßennetzen Europas. Die Schleuse wurde in den Jahren 1964 bis 1966 nach dem Wirkprinzip einer Sparschleuse errichtet. Sie hat eine Hubhöhe von 10,95 m bei einer Nutzlänge der Schleusenkammer von 190 m und einer Nutzbreite von 12 m (Luftbild und Querschnitt s. Bilder 1 und 2). Die Schleusenkammer besteht aus 13 Kammerblöcken und zwei Verschlussblöcken, die von einander und von den Schleusenhäuptern durch Bewegungsfugen mit Fugenbändern getrennt sind. Die gesamte Konstruktion ist als Stahlbetonrahmentragwerk nach den Vorgaben der DIN 1045 von 1959 ausgeführt worden.

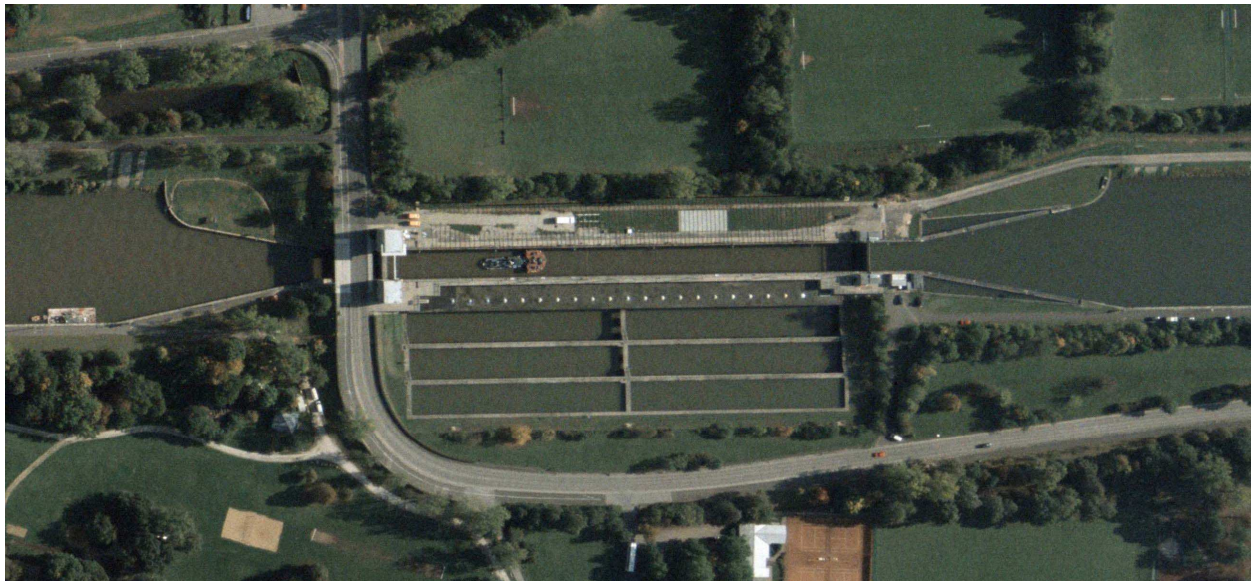


Bild 1: Luftbild der Schleuse Bamberg

Die Füllung und Entleerung der Schleusenkammer erfolgt über zwei kammerparallele Längskanäle und ein unterhalb der Kammersohle angeordnetes Grundlaufsystem. Westlich der Schleusenkammer befinden sich kaskadenförmig angeordnet drei Sparbeckenreihen mit jeweils zwei Becken, die mit dem Grundlaufsystem über insgesamt sechs Zulaufkanäle verbunden sind. Die Verschlussorgane für die Sparbecken befinden sich in einer zwischen den Sparbecken und der Schleusenkammer angeordneten Maschinenhalle.

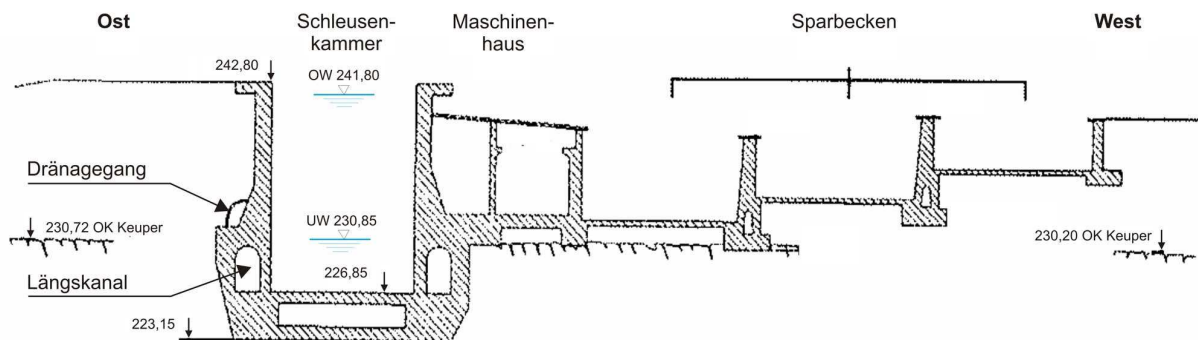


Bild 2: Querschnitt der Schleusenanlage

1.2 Schadensbild

Die Schleusenanlage unterliegt regelmäßigen Bauwerksüberwachungen und Bauwerksinspektionen. Die Bauwerksinspektionen erfolgen bei revisionsbedingten Trockenlegungen der Schleusen-kammer. Im Rahmen dieser Überprüfungen wurden erstmals 1998 Risse im Längskanal der östlichen Kammerwand festgestellt und dokumentiert. Diese waren über weite Strecken geschlossen und größtenteils versintert. Vereinzelt wiesen Feuchtstellen auf. Im Jahr 2003 konnte bei der folgenden Bauwerksinspektion kein Schadensfortschritt festgestellt werden. Um so überraschender war es dann, als im April 2004 im Rahmen einer bauwerksüberwachungsbedingten Begehung des östlichen Dränageganges im Knickpunkt Sohle – Kammerwand ein längs der Kammer verlaufender und bereichsweise stark wasserführender Riss festgestellt wurde. Die kammerwasserstandsabhängig unterschiedliche Intensität der Wasserführung deutete auf eine hydraulische Verbindung zum schräg unterhalb verlaufenden Längskanal hin.

Im Rahmen sofort durchgeführter weiterer Untersuchungen unter Beteiligung der BAW wurde festgestellt, dass die vertikale Haupttragbewehrung der östlichen Kammerwand ($\varnothing 22$, $a = 40$ cm) mindestens im Bereich der Kammerblöcke 3 bis 6 gerissen bzw. ohne Anzeichen von Einschnürungen an der Bruchstelle gebrochen war und somit keine statische Funktion mehr hatte (Bild 3). Weiterhin wiesen die Dränagegang-Fertigteilschalen in den geschädigten Bereichen z. T. erhebliche Risse auf, die deren auf dem Bogenprinzip beruhende Tragwirkung in Frage stellten. Für die betroffenen Kammerwandblöcke bestand daher zumindest bei Unterwasser akute Einsturzgefahr und somit eine erhebliche Gefahr für die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt.



Bild 3: Schematische Schadensdarstellung und gerissene Haupttragbewehrung

Als Schadensursache wurde im Laufe der weiteren Untersuchungen „Schwingungsrissskorrosion“ identifiziert [1]. Dabei handelt es sich um das Zusammenwirken von Bewehrungsermüdung aufgrund der hohen schleusungsbedingten Wechselbeanspruchungen und Bewehrungskorrosion in den wasserdurchströmten Rissbereichen. Die Schadensursache ist insofern besonders tückisch, als das Versagen betroffener Bewehrung ohne Vorankündigung mittels eines Sprödbrechens erfolgt.

1.3 Sofortmaßnahmen

Die Schleuse Bamberg wurde nach der Feststellung des Schadens umgehend für den Schiffsverkehr gesperrt und die Schleusenkammer zur Stabilisierung der Kammerwand auf Oberwasser gestellt. Anschließend wurde ein 3-stufiges Sofortmaßnahmenprogramm durchgeführt. Die östliche Kammerwand wurde an eine im Abstand von ca. 15 m von der Kammerwand eingerammten Spundwand mit GEWI-Ankern rückverankert und auf diese Weise vor dem Kippen in die Schleusenkammer bewahrt. Weiterhin wurde die geschädigte Haupttragbewehrung im Rissbereich mittels Höchstdruckwasserstrahlens so weit freigelegt, bis eine Serie intakter Stähle vorgefunden wurde. Die gebrochenen Bewehrungsstähle wurden durch den Einbau von Bewehrungsmuffen reaktiviert. Der Einbau erfolgte bei Oberwasser und somit bei minimaler Rissweite. Die gebrochenen Fertigteilschalen des Drainageganges wurden durch den Einbau von Holzstützen in „bergmännischer“ Bauweise stabilisiert. Nach einer Gesamtsperrezeit der Schleuse und somit des gesamten MDK von nur vier Tagen konnte der Betrieb schließlich wieder aufgenommen werden. Die Kammerwandbewegungen und die Kräfte in den Rückverankerungen wurden während des Betriebes durch eine Reihe von täglich durchzuführenden händischen Messungen genauestens überwacht, um eine ggf. eintretende weitere Tragfähigkeitsbeeinträchtigung frühzeitig erkennen zu können.

2 Instandsetzungslösung

Die Instandsetzungsplanung für die stark geschädigte östliche Kammerwand basiert auf einer Machbarkeitsstudie der Bundesanstalt für Wasserbau [2]. In diesem Rahmen durchgeführte statische Untersuchungen zur östlichen Kammerwand haben gezeigt, dass neben dem geschädigten Bereich am Fuße des Drainagekanals weitere Teile des Bauwerks hoch beansprucht sind und dem heutigen geforderten Sicherheitsniveau nicht mehr entsprechen. Hier sind vor allem die Wandstiele neben dem Längskanal und Bereiche der Kammersohle zu nennen.

Die Dorsch-Consult Ingenieurgesellschaft mbH mit den Nachunternehmern Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH und KHP König, Heunisch und Partner wurde mit der Planung der Instandsetzungsmaßnahme beauftragt. Als wesentliche Randbedingungen waren zu berücksichtigen, dass die Baumaßnahme unter laufendem Schiffsverkehr erfolgen muss und dass die vorhandene Konstruktion weder in den Bauzuständen noch im Endzustand stärker belastet werden darf, als dies vor Ausführungsbeginn der Fall war. Weiterhin galt es, die Eingriffe in das Nachbargrundstück sowie in den Grundwasserhaushalt so gering wie möglich zu halten und das Bauwerk für eine spätere zweite Schleuse auf der Ostseite nicht nachhaltig zu beeinträchtigen. Daher kam letztendlich für die Sanierung nur eine „große Lösung“ mit erdseitiger Verstärkungsstruktur aus Stahlbeton und tiefer Baugrube in Frage (Bild 4). Die Verstärkungsstruktur wird nach dem heutigen Stand der Wasserbautechnik in fugenloser Ausführung errichtet und gründet auf mantelverpressten Bohrpfehlen (\varnothing 1,2 m) mit einem Achsabstand von 2 m und einer Länge von 9 m, die bis in den festen Fels reichen. Als erste Instandsetzungsmaßnahme im Vorgriff auf die geplante Verstärkung wurde eine Vernadelung des Rissbereiches mittels Rippenstäben durchgeführt.

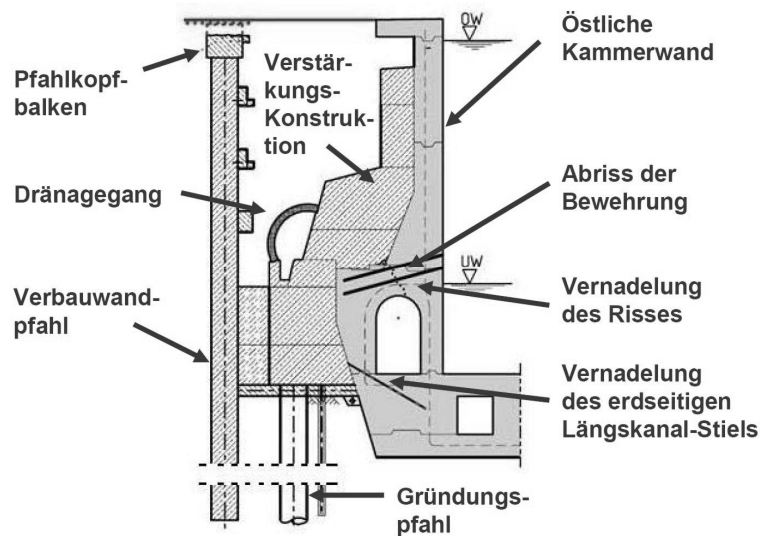


Bild 4: Stahlbeton-Verstärkungsstruktur der östlichen Kammerwand

2.1 Planung und Entwicklung des Baugrubenkonzeptes

Im Hinblick auf die Sanierung der Schleuse wurde ein Baugrundgutachten durch die BAW erstellt. Unter der ca. 13 m mächtigen Hinterfüllung der Kammerwand aus kiesigen Sanden und sandigen Kiesen geringer bis mittlerer Festigkeit wurde Burgsandstein (mittlerer Keuper) als Abfolge von grauen Sandsteinen und rotbraunem Schluffstein in unterschiedlichen Verfestigungs- und Verwitterungszuständen angetroffen (s. Bild 10). Die Schleusenkammer ist im mürben Schluffstein gegründet.

Für die Herstellung der Verstärkungsstruktur war eine ca. 17 m tiefe Baugrube erforderlich. Diese wurde als senkrechte Verbaupfahlwand ausgeführt, da die Schleuse während der Baumaßnahme in Betrieb bleiben und die Kammerwand daher mittels Steifen an die Verbaupfahlwand abgestützt werden muss. Der Abstand zur Kammerwand wurde unter Berücksichtigung der erforderlichen Arbeitsraumbreite den beengten Verhältnissen auf der östlichen Planie entsprechend minimal bemessen.

Die Anforderungen an die Steifigkeit des Baugrubenverbau und eine weitere Vorgabe für die Planung, dass die Verbaupfahlwand auch ohne Aussteifungen zur Kammerwand standsicher sein muss und im Zuge der Aushubarbeiten nur sehr kleine Verformungen aufweisen sollte, ließen eine mehrfach rückverankerte Bohrpfahlwand als einzig in Frage kommende Alternative zu. Auf der Basis umfangreicher FEM-Berechnungen wurde eine 5-fach mit Verpressankern rückverankerte, aufgelöste Bohrpfahlwand mit 1,2 m Pfahldurchmesser und einem Pfahlachsabstand von 2 m mit Spritzbetonausfachung angeordnet.

Ausgehend von zunächst vier Steifenlagen, mit denen die Schleusenkammerwand an den Verbau gekoppelt wird, wurden für die verschiedenen Aushubzustände und die möglichen Kammerwasserstände Steifenkräfte ermittelt, die in der vorhandenen Kammerwand und deren eingebauter Bewehrung zu nicht aufnehmbaren Schnittkräften führen würden. Aufgrund der kopplungsbedingten Wechselwirkungen zwischen der Kammerwand und der Verbaupfahlwand ergab sich das Erfordernis, die Steifenkräfte mit Hilfe von zwischen den Steifen und den Stahlbetongurten vor der Verbaupfahlwand montierten Hydraulikpressen zu regulieren. Die Berechnungen haben weiterhin gezeigt, dass bei einem einzelnen Aushubzustand eine kammerwasserstandsabhängige Regulierung der Steifenkräfte erforderlich werden kann. Eine hierfür notwendige automatisierte, elektronische Steifenkraftregulierungsanlage, bei der die Hydraulikpressen ständig unter Druck stehen müssen und nicht nach der Einstellung der erforderlichen Kräfte auf Stellringe abgesetzt werden können, wurde als zu risikobehaftet und baupraktisch nicht umsetzbar beurteilt und daher abgelehnt.

In der Folge wurde das Baugrubenkonzept in Abstimmung mit der BAW überarbeitet. Um auf eine kammerwasserstandsabhängige Steifenkraftregulierung verzichten zu können, wurden fortan 5 Steifenlagen

mit einstellbaren Hydraulikpressen, eine Hilfssteifenlage und eine Betonsteife vorgesehen (s. Bild 5). Die Hilfssteifenlage ist nicht kraftregulierbar, aber zur Stützung der schwach bewehrten, erdseitigen Längskanalwand planmäßig durch Tellerfedern vorgespannt. Die Steifen wurden in den Steifenlagen 1 bis 4 in einem Achsmaß von 4 m und in den Steifenlagen 5 und der Hilfssteifenlage in einem Achsabstand von 2 m angeordnet. Die Betonsteife auf Höhenlage der Schleusenkammersohle wurde flächig über die gesamte Kammerlänge eingebaut.

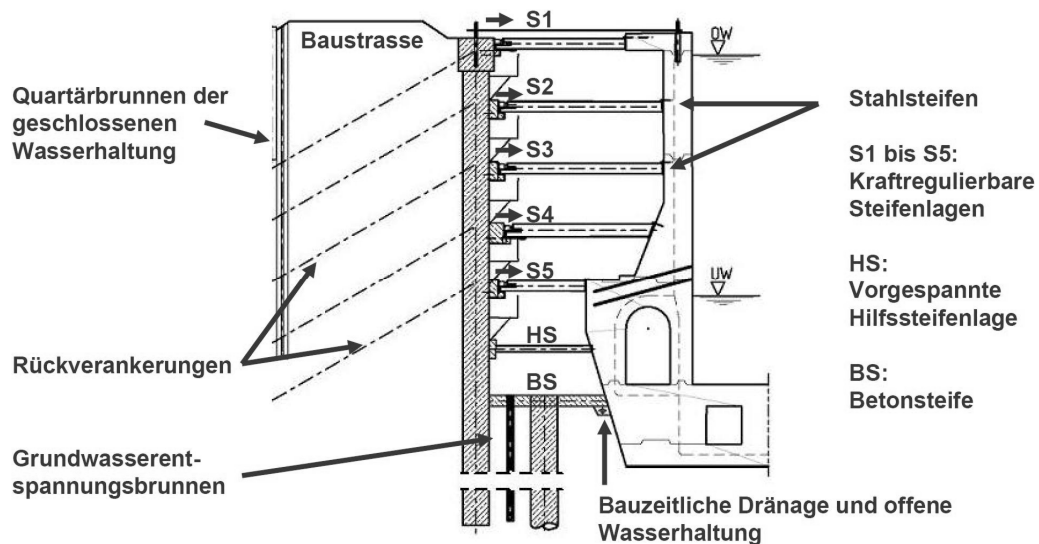


Bild 5: Baugrubenkonzept mit rückverankerter Bohrpfahlwand und Aussteifungen

Die weiteren Berechnungen haben ergeben, dass diese Konstellation Steifenkrafteinstellungen nur beim Erreichen neuer Aushubzustände bzw. beim Anspannen der Verbauwandanker erforderlich macht. In den dazwischen liegenden Zeiten kann die Schleuse ohne Steifenkraftregulierungen betrieben werden.

Um vor der Instandsetzung des am stärksten beschädigten Kammerbereiches bereits Erfahrungen mit der Umsetzung des baubetrieblichen Konzeptes und der Reaktion des Systems in den einzelnen Bauzuständen aus den bereits sanierten Abschnitten zu sammeln und aufgrund der hohen Anzahl von erforderlichen Stahlsteifen wurde unter Abwägung von bedarfs- und bauzeitlichen Aspekten eine Unterteilung der Maßnahme in 3 Bauabschnitte (Teilbaugruben) in Schleusenlängsrichtung vorgenommen.

Der Grundwasserspiegel erdseitig der Kammerwand wurde vor Beginn der Sanierung durch eine begehbare Drainage abgesenkt (s. Bild 2). Während der Baumaßnahme wird dieser mittels einer erdseitig der Verbauwand angeordneten Brunnengalerie auf diesem Niveau gehalten (s. Bild 5). Eine zusätzliche Absenkung darüber hinaus war aufgrund wasserwirtschaftlicher Aspekte nicht zulässig. Die Restwasserhaltung in der Baugrube erfolgt durch eine offene Wasserhaltung zur Fassung von Sicker- und Kluftwasser aus den Keuperschichten und Schleusenverlustwasser infolge möglicher Undichtigkeiten des Bauwerks. Zusätzlich dienen Grundwasserentspannungsbrunnen als Sicherung der Baugrubensohle gegen Auftrieb.

2.2 Bauausführung

Die Baumaßnahme, die durch die Max Bögl Bauunternehmung GmbH & Co. KG ausgeführt wird, begann mit der Herstellung der Bohrpfähle für die Verbauwand auf gesamter Kammerlänge. Hierfür wurde eine Arbeitsebene geschüttet, sodass das Bohrpfahlgerät mit Verrohrungsgerät (BG 25) oberhalb der GEWI-Anker der Rückverhängung der Kammerwand arbeiten konnte. Bei der Herstellung der Bohrpfähle mussten dann einzelne Rückverankerungen zeitweise ausgebaut werden. Anschließend erfolgte, ebenfalls beeinträchtigt durch die querenden Rückverankerungen, die Herstellung des Pfahlkopfbalkens (Bild 6).



Bild 6: Herstellung des Pfahlkopfbalkens unter den Rückverankerungen der Kammerwand

Erst nach der Fertigstellung des Pfahlkopfbalkens konnte mit der Herstellung der mantelverpressten Gründungspfähle ebenfalls auf gesamter Kammerlänge begonnen werden, da das Gewicht des Bohrgerätes die Kammerwand möglichst nicht zusätzlich belasten sollte. Beim Niederbringen der Gründungspfähle wurde daher stets darauf geachtet, dass sich der Geräteschwerpunkt über oder erdseitig des Pfahlkopfbalkens und damit der Verbauwandpfähle befand. Die Gründungspfähle wurden bis auf Höhenlage der geplanten Baugrubensohle betoniert und die darüber liegende Bohrlochstrecke mit Einkornbeton bzw. zementversetztem Aushubmaterial verfüllt. Danach begann bauabschnittsweise die Erstellung der Baugrube. Bis auf die Höhenlage der Steifenlage 4 wurde jeweils auf der gesamten Abschnittslänge ausgehoben. Hierzu kam in den Aushubbereichen bis zur Steifenlage 3 ein Langstielbagger zum Einsatz. In den unteren Aushubbereichen, insbesondere ab der Steifenlage 5 mit einem Achsabstand der Aussteifungen von 2 m, wurde der Aushub mit Hilfe eines Teleskopbaggers gefördert. Dieser wurde von einem in der Baugrube unter sehr beengten Verhältnissen arbeitenden Kleinbagger unterstützt (Bild 7).



Bild 7: Aushubförderung bei beengten Platzverhältnissen mit Teleskopbagger

In Schritten von jeweils ca. 50 cm Tiefe wurde die bewehrte Spritzbetonausfachung zwischen den Bohrpfehlen der Verbauwand nachgezogen. Nach dem Erreichen des jeweiligen Aushubniveaus wurden die Verpressanker der Rückverankerung an jedem Verbauwand-Pfahl eingebaut. Es kamen in den verschiedenen Ankerlagen Anker mit 2, 4, 6 oder 11 Litzen und Längen zwischen 21 m und 38,5 m zum Einsatz. Für die Bohrarbeiten kam unter den beengten Platzverhältnissen (Baugrubenbreite und nutzbare Höhe unter den Stahlsteifen) nur ein kleines, sehr leistungsstarkes Bohrgerät in Frage (Bild 8).



Bild 8: Herstellung der Verpressanker in der Ankerlage 5 auf Höhe des Drainagegangs

Anschließend wurde in den Steifenlagen 2 bis 4 an der Verbauwand ein lastverteilerndes und die Steifigkeit der Verbauwand erhöhender Stahlbetongurt betoniert, der Konsolen für die Aufnahme der im Achsabstand von 4 m einzubauenden kraftregulierbaren Stahlsteifen enthielt. Danach erfolgte der Einbau der kraftregulierbaren Steifen und der zur Überwachung erforderlichen Messtechnik (Kraftmessdosen und Temperatursensoren).

Unterhalb der 5. Steifenlage erfolgte der Aushub aus Sicherheitsgründen nur noch in nächtlichen Schifffahrtssperren von 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr bei Schleusenammerwasserstand auf Unterwasser, da nun der sensible und schwach bewehrte Längskanal erdseitig freigelegt werden musste (Bild 9). Die Längsausdehnung des Aushubs wurde dabei auf eine Steifenfeldlänge von 2 m eingeschränkt. Der Aushub konnte erst weitergeführt werden, wenn die jeweilige Hilfssteife eingebaut und mittels eines eingebauten Tellerfederpakets kraftbeaufschlagt wurde. Unterhalb der Hilfssteifenlage bis zur Endteufe der Baugrube war grundsätzlich in gleicher Weise zu verfahren. Anstelle einer Hilfssteife war hier aber ein 2 m breiter Abschnitt der Unterbetonschicht (Betonsteife) einzubauen. Im Bauablauf bot es sich dann aber an, für den letzten Aushubschritt und den Einbau der Betonsteife in allen Bauabschnitten die Zeiten von Schifffahrtssperren am MDK zu nutzen. Während der Schifffahrtssperren mit Dauern von 8, 12 oder 14 Tagen wurde die Schleusenammer auf Unterwasserniveau gehalten. So konnte auf einen Einbau in 2 m-Schritten verzichtet werden und die Arbeiten wurden in wesentlich größeren Abschnitten durchgeführt.



Bild 9: Blick in die Baugrube zwischen Steifenlage 5 und Hilfssteifenlage, rechts Längskanalwand

Mit dem Einbau der Verstärkungsstruktur, der in 7 Betonierabschnitten erfolgte, wurden die Aussteifungen sukzessive ausgebaut und die Baugrube wieder verfüllt. Die Verpressanker wurden nach dem Ausbau der jeweiligen Steifenlage entspannt. Die Verfüllung der Baugrube erfolgte bis auf Höhenlage des Drainagegangs mit einem Einkornbeton, da wasserdurchlässiges Bodenmaterial aufgrund der geringen Arbeitsraumbreiten nicht ausreichend hätte verdichtet werden können. In Höhe des neuen begehbaren Drainagegangs wurde auf gesamter verbleibender Baugrubenbreite ein zweistufiger Kiesfilter eingebaut. Die Verfüllung des Bereichs bis zur 2. Steifenlage erfolgte mit dem ausgebauten Verfüllmaterial. Die restliche Höhe bis zum Fahrbahnaufbau der wiederherzustellenden Schleusenplanie wird mit Blähton vorgenommen. Durch die geringe Wichte des Blähtonmaterials kann der wesentliche Teil der Zusatzlasten aus dem Beton der Verstärkungsstruktur kompensiert werden.

3 Anwendung der Beobachtungsmethode

Aufgrund des schwierigen Bauablaufes bei laufendem Schleusenbetrieb wurde für die Bauausführung ein Monitoring-System installiert, um die rechnerische Prognose des Systemverhaltens zu überprüfen. So kann bei Abweichungen von der Prognose rechtzeitig auf unplanmäßiges Verhalten reagiert werden (Beobachtungsmethode). Hierfür wurden Notfallpläne für verschiedene Szenarien entwickelt.

3.1 Berechnungsmodell

Im Zuge der Erarbeitung des Baugrubenkonzeptes wurde ein Berechnungsmodell erstellt, welches die mechanische Kopplung zwischen dem anstehenden Boden, der Baugrubenwand und der Schleuse berücksichtigt. Durch diese komplexen Wechselwirkungen war hier nur mit Hilfe der FE-Methode eine möglichst realistische Abschätzung der Erddruckverläufe, der Steifenkräfte und der Verformungen der Kammerwand zu erzielen. Die Berechnungen wurden mit dem Programm Plaxis an einem 2D-Modell durchgeführt (Bild 10).

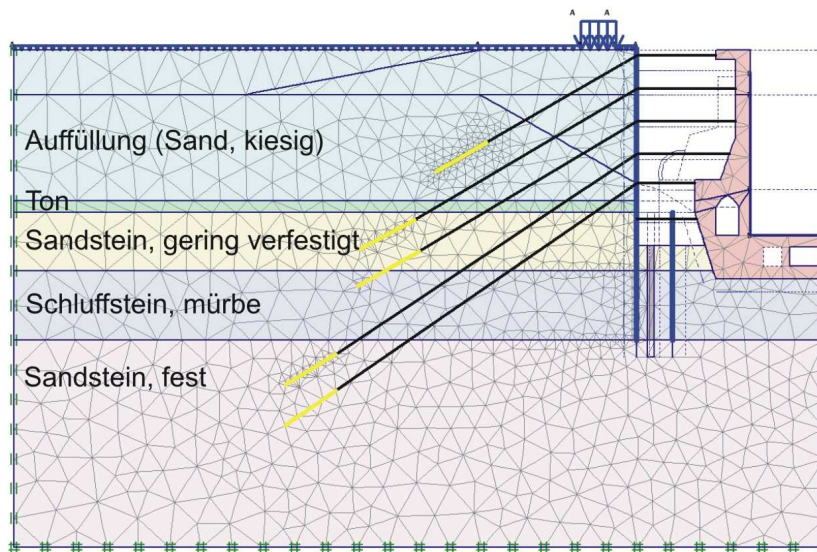


Bild 10: Berechnungsmodell mit Baugrubenkonstruktion und Baugrundaufbau [4]

Für die Nachrechnungen des Schadensfalles und die Erarbeitung des Instandsetzungskonzeptes war vor allem das Verformungsverhalten des Baugrundes von Bedeutung. Deshalb wurden im Rahmen der Baugrunderkundung neben Laborversuchen in den teilweise gering verfestigten Keuperschichten Bohrlochaufweitungsversuche mit dem Dilatometer und der Seitendrucksonde als in-situ-Versuche durchgeführt. Die Festigkeit und Steifigkeit der Auffüllung wurde anhand der Ergebnisse von Sondierungen mit der schweren Rammsonde beurteilt.

Als Stoffgesetz für die Auffüllung, den Ton und den gering verfestigten Sandstein wurde das Hardening-Soil-Modell verwendet. Charakteristisch für dieses ist die Berücksichtigung unterschiedlicher Bodensteifigkeiten bei Erst- und Wiederbelastung und eine spannungsabhängige Formulierung für die Steifigkeit basierend auf dem Ansatz von Ohde. Für die Felsschichten unterhalb der Sohle wurde das linear-elastische ideal-plastische Stoffgesetz nach Mohr-Coulomb eingesetzt. Als Steifigkeit für den Fels wurde die aus Versuchen ermittelte Wiederbelastungssteifigkeit E_w verwendet. Der Beton des Bestandes und der Pfahlwand wurde linear elastisch berücksichtigt.

Als besonders wertvoll für die Verifizierung der Bodenparameter haben sich Verformungsmessungen am Bauwerk vor Beginn der Sanierungsmaßnahme erwiesen. Dadurch konnten schon im Zuge der Erstellung des Baugrundgutachtens und der Machbarkeitsuntersuchungen zum Baugrubenkonzept durch die BAW [2, 3] ein Vergleich der in-situ gemessenen Verformungen am Kammerwandkopf bei wechselnden Wasserständen in der Schleuse mit berechneten Verformungen im FEM-Modell durchgeführt und somit überprüft werden, wie gut das Berechnungsmodell die realen Verhältnisse abbildet.

Bei der Berücksichtigung von nichtlinearen Materialgesetzen ist der Endzustand abhängig von der Belastungsgeschichte. Daher wurden in der FEM-Berechnung alle zur Umsetzung der Instandsetzungsmaßnahme geplanten Bauphasen (Bau der Schleuse, Vorbauzustände, Rückbauzustände) im Modell abgebildet. Zusätzlich wurden zwischen den einzelnen Phasen immer Lastwechsel von Unterwasser zu Oberwasser eingeführt, um das unterschiedliche Verhalten des Bodens bei Erst- und Wiederbelastung zu berücksichtigen. Insgesamt ergaben sich so 133 Berechnungsphasen. Die berechneten Verformungen der Kammerwand und die Steifenkräfte wurden für alle Bauphasen ausgewertet und dienten als Grundlage für die Bewertung der Bauwerksmessungen im Zuge der Ausführung. Für die statischen Nachweise der bestehenden Kammerwand, die mit Hilfe einer Massivbau-spezifischen FEM-Software durchgeführt wurden, dienten die Erddruckverläufe auf die Kammerwand aus Plaxis zusammen mit den Steifenkräften als Eingangsgrößen. Für die Bemessung der Bohrpfahlwand wurden die Ergebnisse der Plaxis-Berechnung ausgewertet und mit einer konventionellen Berechnung mit einem Stabwerksprogramm verglichen. Die Bemessung erfolgte mit dem ungünstigsten Wert.

3.2 Monitoring-System

Die zentralen Bestandteile des Monitoring-Systems sind die Messung der horizontalen Verformungen des Kammerwandkopfes an jedem Kammerblock mit einem automatischen Tachymeter und die Messung aller Steifenkräfte der Lagen 1-5 mit Kraftmessdosen. Die Erfassung der Messwerte erfolgt in Intervallen von max. 6 Minuten. Bei der maximalen Aushubtiefe fallen pro Messintervall bis zu 230 Messwerte an. Eine für diese Maßnahme entwickelte Software bereitet unter Berücksichtigung aller das Objekt beeinflussenden Parameter (wie Kammerwasserstand, Luft- und Steifentemperatur, Aushubzustände, usw.) die Messdaten 24 Std./Tag auf. Die gemessenen Steifenkräfte und Verformungen werden baubegleitend kontinuierlich in Bezug auf die Einhaltung der tragwerksplanerisch vorgegebenen Grenzwerte ausgewertet. Prinzipiell gilt, dass bei Unterwasserstand in der Kammer die auf die Wand wirkenden Steifenkräfte S_{UW} nicht zu groß werden dürfen, damit die Wand nicht in die Schleuse hinein gedrückt wird. Andererseits müssen die Steifenkräfte bei Oberwasser S_{OW} definierte Mindestwerte erreichen (vgl. Bild 11), um die Kammerwand nicht zu überlasten. Die Steifenkräfte S_{OW} werden maßgeblich durch die Steifigkeit des hinter der Bohrpfehlwand anstehenden Baugrunds bestimmt.

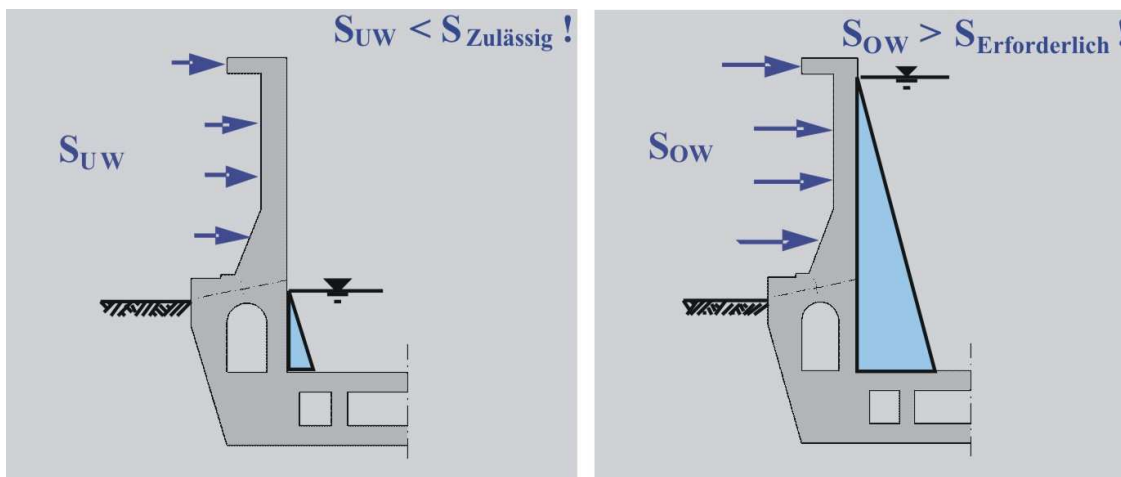


Bild 11: Grenzwerte für die Steifenkräfte bei Unterwasser- (links) und Oberwasserstand (rechts)

Für eine schnelle Beurteilung des Bauwerkszustands werden die Messwerte graphisch aufbereitet und sind über das Internet verfügbar. Das in Bild 12 dargestellte Übersichtsfenster des Monitoring-Systems zeigt einen Längsschnitt durch die Baugrube des Bauabschnittes 1. Die Kreise zeigen jeweils die aktuellen Wandkopfverformungen (oben) und Steifenkräfte bei Oberwasser und Unterwasser (unten).

Eine an die Messwerterfassung angeschlossene „Ampelschaltung“ regelt den Schleusenbetrieb bzw. den Baubetrieb (s. Bild 12 unten):

- Grün: Arbeiten laufen planmäßig; Schleuse in Betrieb
- Gelb: Warnung Grenzwertüberschreitung, Ursachenkontrolle
- Rot: Alarm, Schleusung anhalten, Schleuse räumen

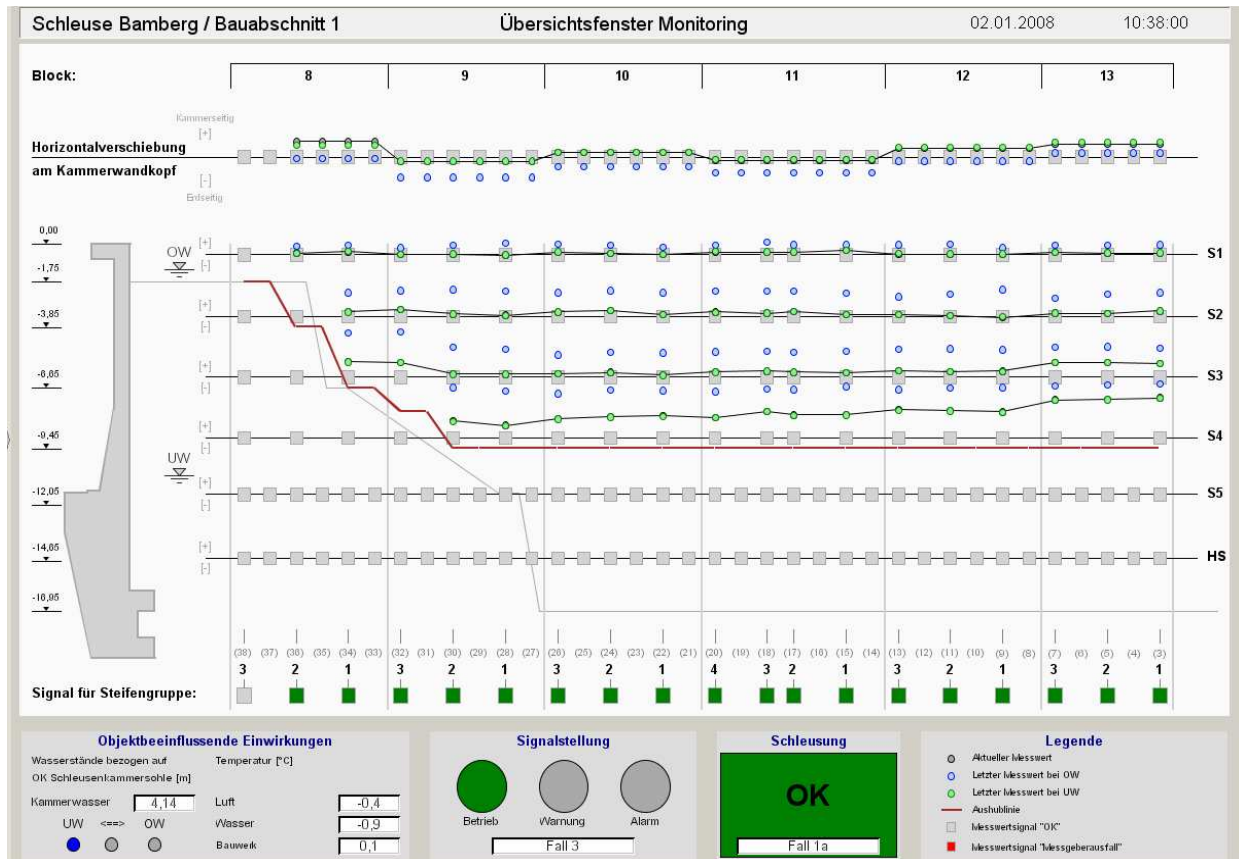


Bild 12: Übersichtsfenster Monitoring-System

3.3 Messergebnisse

Nachfolgend werden die am Bauwerk im Bauabschnitt 1 gemessenen Größen den in der Planung am FEM-Modell ermittelten rechnerischen Ergebnissen gegenübergestellt. Es werden die Verformungen des Kammerwandkopfes, der Verbauwand und die Steifenkräfte betrachtet.

Die gemessenen **Verformungen** des Kammerwandkopfes infolge Füllung der Schleusenammer liegen bei ca. 3-4 mm und ändern sich bei fortschreitendem Aushub der Baugrube nicht signifikant. Dies stimmt gut mit den prognostizierten Werten überein und liegt somit innerhalb der in der Planung in Abhängigkeit vom Aushubniveau definierten Grenzwerte von 4 - 6 mm.

In zwei Messquerschnitten (in Block 11 und 12) wurden zusätzlich zu den geodätischen Verformungsmessungen am Kammerwandkopf und den Steifenkraftmessungen Inklinometer- und Extensometermessungen durchgeführt, um mehr Informationen zum Verhalten der Bohrpfehlwand zu erhalten. Die im Bohrpfehl liegenden Inklinometerrohre wurden ca. 6 m über den Pfehlfuß hinaus verlängert und haben somit eine Gesamtlänge von 32 m. Damit ist gewährleistet, dass der Inklinometerfuß außerhalb des durch die Baumaßnahme beeinflussten Bereiches liegt und dieser somit als Fixpunkt betrachtet werden kann.

Die in Bild 13 dargestellten Ergebnisse sind auf die Ende September 2007 durchgeführte Nullmessung bezogen. Während dieser Nullmessung war bereits eine Aushubtiefe von ca. 4 m erreicht, so dass die gemessenen Verformungen die Anteile aus den ersten Bauphasen nicht enthalten und damit nicht als Gesamtverformungen zu verstehen sind. Dies wurde bei den zum Vergleich dargestellten berechneten Verschiebungen berücksichtigt. Die hier ausgewerteten Messungen wurden alle bei Unterwasserstand in der Schleuse durchgeführt. Es zeigt sich, dass bedingt durch die Ankervorspannung und die auf die Bohrpfehlwand wirkenden Steifenkräfte nur anfänglich eine Wandbewegung in Richtung Kammer stattfindet.

Ab dem Aushubniveau 14,5 m wird die Verbauwand über die ganze Höhe ins Erdreich hineingedrückt. Der Größtwert dieser Verformung liegt am Wandkopf bei ca. 1 cm im Endaushubzustand. Die Abweichung zwischen Messung und Berechnung liegt meist unter 2 mm, was in der Größenordnung der Messgenauigkeit liegt.

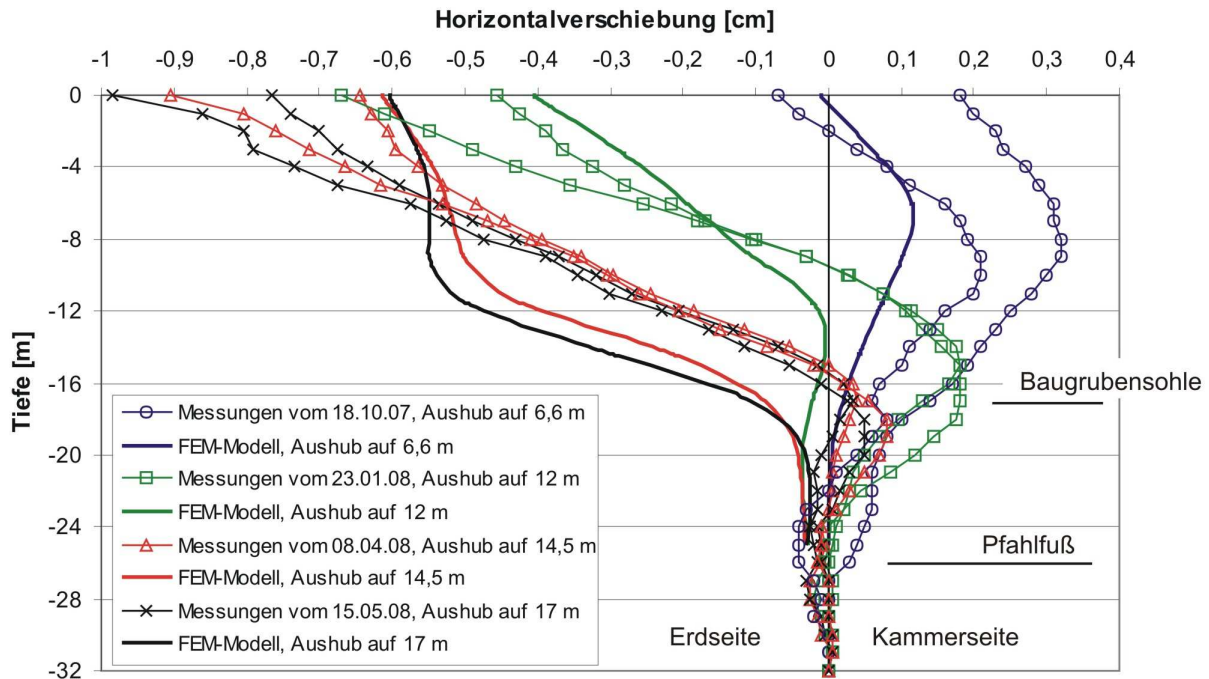


Bild 13: Horizontale Verschiebungen der Bohrpfahlwand (Inklinometermessungen Messquerschnitte 1 und 2) und Vergleich mit den Ergebnissen der FEM-Berechnung [5]

Die ersten Messergebnisse der **Steifenkräfte** waren zum Teil schwer nachvollziehbar, da die Steifenkräfte innerhalb einer Lage stark schwankten und auch der Zuwachs der Steifenkräfte bei Füllung der Schleusenammer zunächst geringer war als erwartet. Nach Ursachenforschung konnte dies auf Schlupf in den Steifenanschlüssen an die Verbau- bzw. Kammerwand zurückgeführt werden. Im Gegensatz zur im Berechnungsmodell (üblicherweise) getroffenen Annahme, dass die Federwirkung der Steife allein über deren Dehnsteifigkeit EA bezogen auf ihre Länge definiert ist, zeigten sich nicht vorhersehbare Schlupf- und Federwirkungen der Steifenkonstruktion mit ihren integrierten Pressen, Kraftmessdosen und Futterplatten. Durch Kontrolle der Anschlüsse mit teilweiser Nachbesserung von Rissen im Vergussmörtel und Optimierung der Anschlusskonstruktion (z. B. weniger Futterplatten) zeigte sich eine Vereinheitlichung der Kräfte innerhalb einer Lage. Um den verbleibenden Schlupf auszuschalten muss eine Grundkraft in den Steifen bei Unterwasser vorhanden sein (im dargestellten Beispiel einer Steife aus Lage 2 in Bild 14 ca. 100 kN). Unterhalb dieser Grundkraft ergibt sich eine reduzierte Steifigkeit und somit ein geringerer Lastzuwachs infolge Wasserfüllung der Kammer. Um die Einhaltung der Grenzwerte für die Steifenkräfte zu gewährleisten, war also, abweichend von der ursprünglich geplanten Vorgehensweise, schon bei Unterwasser in allen Steifenlagen eine Kraft einzutragen.

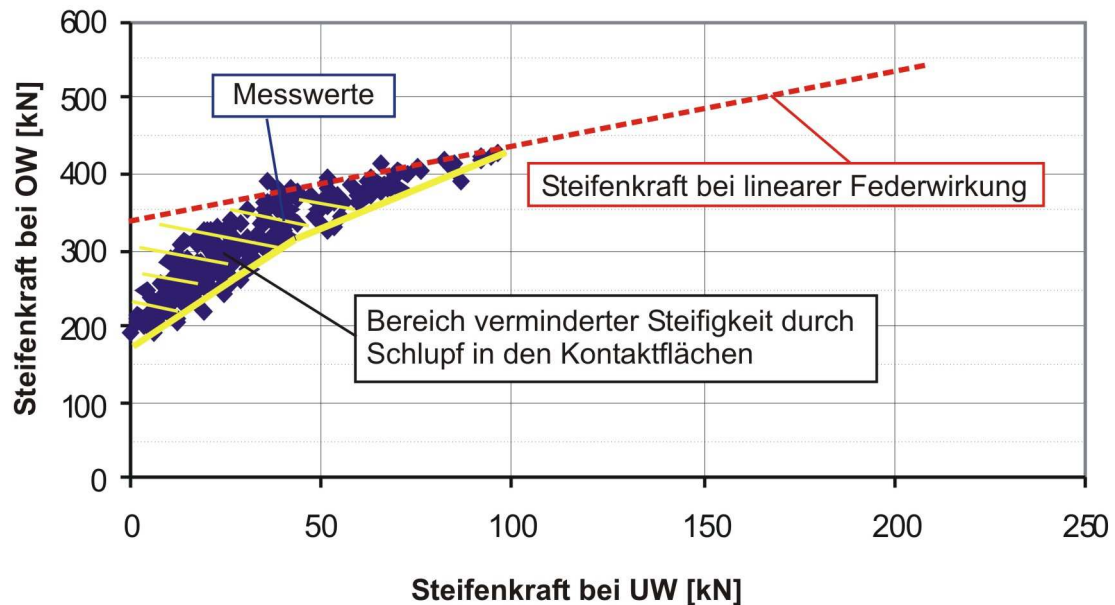


Bild 14: Steifenkraftzuwachs infolge Schleusenfüllung von Unterwasser (UW) auf Oberwasser (OW)

Zusammenfassend zeigte sich für die Messergebnisse eine hinreichende Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung sowohl bei den Kopfverformungen der Kammerwand, den Verformungen der Verbauwand als auch bei den Steifenkraftzuwächsen aus den Wasserstandsänderungen in der Schleuse. Eine Anpassung der Eingangsparameter des Berechnungsmodells im Rahmen der Beobachtungsmethode zur besseren Erfassung des gemessenen Bauwerksverhaltens war daher nicht erforderlich.

Literatur

- [1] Schleuse Bamberg (MDK), Untersuchung der Schadensursache für die Rissbildung an der östlichen Kammerwand, BAW-Nr. 7.02.101.04.B1, Karlsruhe, Mai 2005
- [2] Machbarkeitsstudie zur Sanierung der östlichen Kammerwand der Schleuse Bamberg, BAW-Nr. 7.02.10104.00, Oktober 2004
- [3] O. Stelzer: Feasibility study of the repair of Bamberg Lock while in operation, XXXI. Internationaler Schiffahrtskongress, Estoril/Portugal, Mai 2006
- [4] D. Gheorghiu, J. Kunze, O. Stelzer: Anwendung der FEM bei der Sanierung der Schleuse Bamberg, BAW-Kolloquium, Karlsruhe, Februar 2008
- [5] O. Stelzer, M. Heunisch, S. Schum: Monitoring the repair of a lock while in operation, 9th International Geotechnical Conference "Geotechnical Monitoring", Slovak University of Technology, Bratislava, Slowakei, 1./2. Juni 2009